

# 장기 모니터링 환경에서 센서 패키징 방법에 따른 광섬유 센서의 신호 안정성 평가

## Evaluation of Signal Stability of Fiber Optic Sensors with respect to Sensor Packaging Methods in Long-Term Monitoring

강동훈\*, 김현영\*\*\*, 김대현\*\*\*†

Donghoon Kang\*, Heon-Young Kim\*\*\* and Dae-Hyun Kim\*\*\*†

**초 록** 다중화와 절대측정이 가능한 광섬유 브래그 격자(FBG) 센서는 다양한 분야의 건전성 모니터링에 활용되고 있으며, 패키징을 통한 빠른 상용화가 진행 중이다. 하지만, 장시간 구조 건전성 모니터링시 FBG 센서는 반복 열하중에 노출되며 이는 센서의 신호 안정성에 영향을 줄 수 있어 면밀한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 일반적으로 사용되는 FBG 센서의 브래그 격자 부분에 대한 두 가지 패키징 방법(양단 접착, 직접 접착)에 대해 반복 열하중이 신호 안정성에 미치는 영향을 고찰하였다. 구체적으로,  $-20^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 의 온도 조건에서 300사이클 동안 FBG 센서의 브래그 파장, 광 강도값, 반너비값 등의 신호 특성을 관찰하였으며 직접 접착에 대해 수행한 선행 연구와의 비교를 통해 두 가지 패키징 방법에 대한 신호 안정성을 평가하였다. 시험 결과, 장기간 반복 열하중이 가해지는 환경에 노출된 FBG 센서의 경우 양단 접착이 직접 접착보다 신호 안정성이 더 높기 때문에 FBG 센서의 패키징시 양단 접착 방식이 더 효과적임을 확인하였다.

**주요용어:** 장기 모니터링, 센서 패키징, 광섬유 센서, 광섬유 브래그 격자, 신호 안정성

**Abstract** Fiber Bragg grating (FBG) sensors are applied in structural health monitoring (SHM) in various application fields because of their ease of multiplexing and capability of performing absolute measurements. Moreover, the packaging methods of FBG sensors accelerate their commercialization rapidly. However, long-term SHM exposes the FBG sensors to cyclic thermal loads, and a investigation is required because it finally leads to the signal instability of the FBG sensors. In this study, the effects of sensor packaging methods two methods are generally used for the FBGs: (bonding both sides of the FBG or bonding the FBG directly on signal stability of FBG sensors are investigated. Tests are conducted on specimens in a thermal chamber, over a temperature range from  $-20^{\circ}\text{C}$  to  $60^{\circ}\text{C}$  for 300 cycles. Signal characteristics such as Bragg wavelength, light intensity and full width at half maximum are examined and are compared with those of the FBG sensors, obtained in a previous study under direct bonding conditions. From the comparison, it is observed that the FBG sensors with bonding on both sides of the FBG demonstrate higher signal stabilities when exposed to cyclic thermal loads during long-term SHM. Consequently, it guarantees more effectiveness when packaging the FBG sensors.

**Keywords:** Long-term Monitoring, Sensor Packaging, Fiber Optic Sensor (FOS), Fiber Bragg Grating (FBG), Signal Stability

### 1. 서 론

1990년대 스마트 구조물(smart structures)에 대

한 개념 정립과 본격적인 연구가 시작된 이래 현재까지 센서, 시스템, 분석기법 등 다양한 주제의 연구가 국내·외적으로 활발히 진행되었다. 전통적

[Received: July 29, 2016, Revised: August 16, 2016, Accepted: August 17, 2016] \*한국철도기술연구원 첨단소재연구팀, \*\*연세대학교 기계공학과, \*\*\*서울과학기술대학교 기계·자동차공학과, †Corresponding Author: Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Republic of Korea (E-mail: dkim@seoultech.ac.kr)

인 초음파[1]나 전자기 방법[2]을 통한 결함 탐상과 같은 비파괴검사(non-destructive testing, NDT) 영역을 넘어 고정밀의 광학적 방법[3,4] 기반의 실시간 구조 건전성 모니터링(structural health monitoring, SHM)에 이르기까지 대상 기술과 적용 영역이 폭넓게 확대되었다. 그 결과로 최근 스마트 구조물에 대한 연구는 실용화 단계에 진입하였다는 평가이며, 이와 관련된 실용화 연구[5,6]가 교량, 터널, 플랜트 등 대형 인프라를 중심으로 빠르게 확산되고 있다.

이처럼 구조물의 스마트화를 위해서는 인체의 신경계에 해당하는 센서부를 통해 다양한 물리량과 같은 외란을 측정하는 단계가 기본적으로 요구된다. 스마트 구조물의 센서부로는 다양한 종류의 센서가 이용될 수 있으나, 광섬유 센서(fiber optic sensor)의 경우 전통적 방식의 센서들에 비해 많은 장점이 있어 보다 활발히 채택되고 있다. 특히, 첨단 복합소재의 적용 확대와 함께 타 센서에 비해 복합재 내부에 삽입(embedding)이 상대적으로 용이한 광섬유 센서는 스마트 구조물에 가장 적합한 센서로 각광받고 있다[7,8].

통상 실리카계( $\text{SiO}_2$ ) 광섬유를 기반으로 제작되는 광섬유 센서는 재료적 특성으로 인해 부식(corrosion)에 강하며, 전자기 간섭(electromagnetic interference, EMI)의 영향이 없고, 수십 km까지 원거리 계측이 가능하다. 특히, 다른 광섬유 센서에 비해 다중화(multiplexing), 절대측정(absolute measurement), 대량생산(mass production)에 유리한 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG) 센서는 스마트 구조물을 위해 가장 적합한 센서로 인정받아 국내·외적으로 많은 연구가 수행되고 있다. 뿐만 아니라, FBG 센서는 변형률, 온도의 두 인자에 대해서 선형적인 특성을 가지므로 높은 사용자 편의성을 바탕으로 보다 쉽게 시스템 구축이 가능하다.

한편, FBG 센서를 이용한 구조물의 스마트화를 위해서는 외부 환경에서의 장기 계측 수행이 필수적으로 요구된다. 특히, 외부에서의 장기 계측시 계절적 변화에 의해 유발되는 온도 변화( $\sim$ 수십 $^{\circ}\text{C}$ )는 스마트 구조물의 감지계에 해당하는 센서부에 반복 열하중을 가하게 되며, 이는 곧 센서의 신뢰성에 적지 않은 영향을 줄 수 있다. 특히, 다양한 신뢰성 관련 항목 중에서 센서의 강도 및 신호 안정성은 센서의 수명 및 사용 범

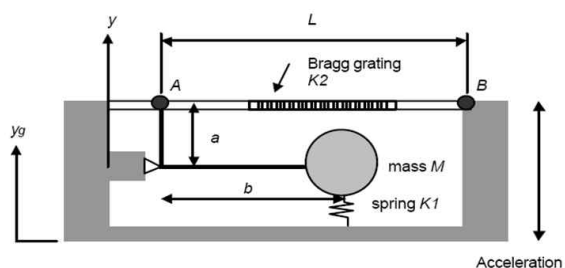


Fig. 1 FBG based accelerometer [12]

위, 그리고 센서의 측정 오차 등과 직접적으로 관련되므로 이에 대한 면밀한 검토가 필수적으로 요구된다.

관련하여 수행된 선행연구로는, 초고온( $900^{\circ}\text{C}$ ) 또는 극저온( $-150^{\circ}\text{C}$ ) 환경에서 FBG 센서의 신호 특성에 대한 연구나 반복 열하중 하에서 FBG 센서의 기계적 강도 변화에 대한 연구가 수행된 바 있다[9,10]. 뿐만 아니라, 패키징된 FBG 센서의 패키징 방법, 구체적으로는 모재(base materials) 및 접착제(adhesives) 종류에 따라 반복 열하중에 의해 유발되는 신호 안정성 영향에 대한 연구[11]가 수행된 바 있다. 하지만, 해당 연구는 FBG 센서의 패키징 방법 중 브래그 격자 부분이 모재에 ‘직접’ 접착되는 경우에 한정하여 수행된 연구로 또 다른 패키징 방법인 브래그 격자 ‘양단’이 접착되는 경우에 대한 검토가 이루어지지 못해 한계가 있었다.

따라서, 본 연구에서는 Fig. 1[12]과 같이 브래그 격자 양단이 접착되어 패키징된 경우 FBG 센서에 반복 열하중이 가해질 때 발생하는 FBG 센서의 신호 특성 변화를 확인하였다. 이를 통해, 장기 구조 건전성 모니터링시 FBG 센서의 패키징 방법이 센서의 신뢰성에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 광섬유 브래그 격자 센서 [13]

FBG 센서의 경우 이미 많은 연구가 수행된 바 있어 센서의 작동 원리 등은 선행문헌[11]을 통해 쉽게 확인 가능하다. 간략히 요약하면, FBG는 광섬유 코어에 주기적인 굴절률 변화를 갖는 격자를 의미하며, 해당 격자가 변형률, 온도와 같은 외란에 노출될 경우 브래그 파장( $\lambda_B$ )이 변하게 되어 식(1)을 통해 원하는 물리량을 측정하는 센서이다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B[(\alpha_f + \xi_f)\Delta T + (1 - p_e)\varepsilon] \quad (1)$$

여기서,  $p_e$ 는 광탄성 상수(photoelastic constant)로 실리카계(Germosilicate glass) 광섬유의 경우 대략 0.22의 값을 가진다. 그리고,  $\alpha_f$ 는 광섬유의 열팽창계수( $0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )이고  $\xi_f$ 는 열광학계수( $6 \times 10^{-6} \sim 11 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )이며 광섬유 소재의 상수값이다.

기본적으로는 식(1)과 같이 변형률( $\varepsilon$ )과 온도변화( $\Delta T$ )에 대해서만 반응하는 센서이나 Fig. 1에서와 같이 다양한 형태의 패키징을 통해 가속도, 변위, 압력 등 대부분의 물리량에 대해 측정이 가능하며 최근 빠른 상용화가 진행 중이다.

### 3. 가속 노화시험

본 연구에서는 장기 구조 건전성 모니터링 시 FBG 센서의 신뢰성 평가에 대한 선행연구[11]에서 검토되지 않은 또 다른 에폭시 부착 방법, 즉 브래그 격자의 ‘양단’ 접착 경우에 대한 반복 열하중 시험을 수행하였다. 시험을 위한 모재 및 접착제의 종류는 선행연구[11]와 동일하게 상용 FBG의 패키징에 많이 활용되는 금속 2종(stainless steel, titanium)과 상온 경화 에폭시 2종(araldite, permapoxy)을 선정하였다. 또한, 반복 열하중 조건도 선행연구[11]와 마찬가지로 계절적 요인에 의한 국내 기후조건이 반영된  $-20^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 로 설정하였다.

#### 3.1. 시편 제작

본 연구에서는 브래그 격자 부분의 양단이 접착된 조건에서 반복 열하중에 대한 센서의 신호 특성, 즉 센서의 신뢰성을 평가하는 것을 목표로 하고 있다. 따라서, Table 1과 같이 각각 2종의 모재 및 접착제에 대해 브래그 격자 부분의 양단이 접착된 총 4종의 시편을 제작하였다. 양단 접착 조건을 모사하기 위해 Fig. 2와 같이 중앙 부분이 함몰된 시편을 이용하여 브래그 격자 부분을 중앙에 위치시키고 시편과 맞닿은 부분을 접착하는 방법을 통해 양단 접착 환경을 모사하였다. FBG는 피복(coating)이 제거된 형태로 이용하였으며 에폭시가 접착되는 광섬유 부분 또한 피복을 제거하여 반복 열하중시 피복에 의한 미끌

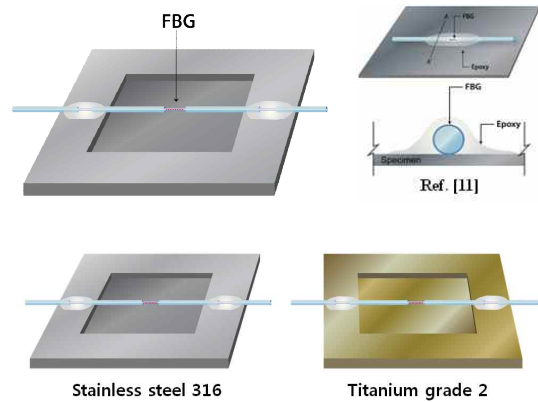


Fig. 2 Configuration of test specimens

Table 1 Specifications of an FBG sensor

Compound of material and epoxy	Bragg wavelength
Stainless steel 316 + araldite	1553 nm
Stainless steel 316 + permapoxy	1553 nm
Titanium grade 2 + araldite	1571 nm
Titanium grade 2 + permapoxy	1571 nm

림 현상을 방지하였다. 시험에 사용된 FBG 센서(FBGKOREA Co.)의 상온에서의 브래그 파장은 Table 1과 같으며, 모든 센서의 반사율은 70%, 게이지 길이 10 mm의 센서를 사용하였다. 그리고, 에폭시는 도포 후 48시간 동안의 상온 경화를 통해 완전 경화를 시킴으로써 시험을 위한 시편 준비를 마무리하였다.

#### 3.2. 실험 방법

반복 열하중 시험을 위한 시험장치 구성은 Fig. 3과 같다. 구체적으로, 항온항습기(TC-ME-025, JEIO-TECH Co.)를 이용하여  $-20^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 의 온도 사이클로 총 300사이클 동안 가속노화를 진행하였다. 환경적인 오차를 제거하기 위해 제작된 4종의 시편은 모두 동시에 실험을 진행하였다. 또한, 온도 사이클은 선행연구[11]에서와 마찬가지로의 조건으로 Fig. 4와 같이 95분/사이클로 부가하였다. 한편, 시험은 광대역 광원(83437A, Agilent Co.)과 광 스펙트럼 분석기(MS9710C, Anritsu Co.)를 이용하여 반복 열하중에 따른 FBG 센서의 피크 신호 특성 변화를 분석하는 방법으로 진행하였다. 신호 측정은 선행연구[11]와 마찬가지로 총 6개 구간(0, 50, 100, 150, 200,

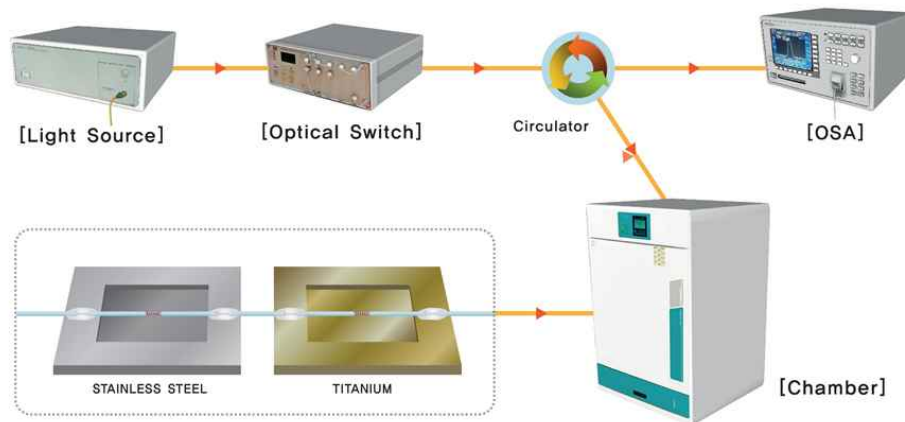


Fig. 3 Experimental setup for a accelerated aging test of FBG sensors in a thermal chamber

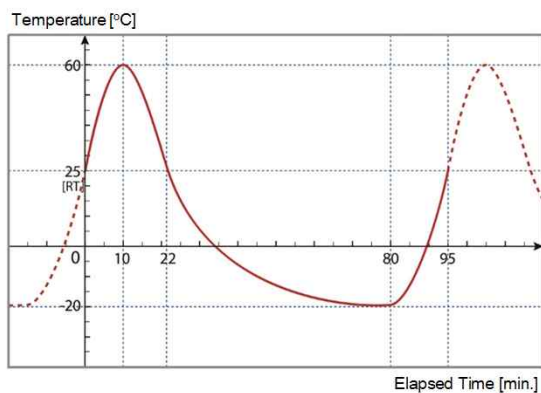


Fig. 4 Thermal cycle imposed to specimens [11]

300사이클)에서 25°C가 되는 시점, 즉 같은 온도에서 측정함으로써 온도 변화에 따른 영향을 제거하였다.

### 3.3. 시험 결과

Fig. 5는 사이클이 진행됨에 따라 동일 온도인 25°C에서 측정된 FBG 센서의 브래그 파장값을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 브래그 격자 양단이 접착(이후 Type 1)된 경우 사이클 경과에 따라 브래그 파장값이 소폭 변화하는 것으로 나타났다. 반면, Fig. 6에서와 같이 브래그 격자 부분이 직접 접착(이후 Type 2)된 경우인 선행연구 [11] 결과에서는 사이클 경과에 따라 50사이클에서 큰 변화가 발생하며 이후 유지되는 경향을 보여 대조를 이뤘다. 그 이유는 선행연구[11]에서 제시된 것처럼 센서, 접착제, 모재 사이의 열팽창 계수 차이와 두 가지 항목의 인터페이스라 할 수 있는 각각의 표면 상태에서 기인하는 복합적인

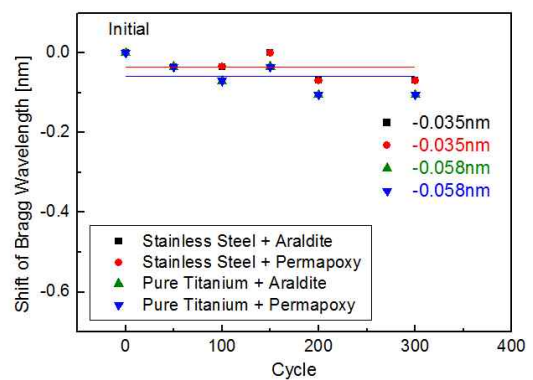


Fig. 5 Bragg wavelength shifts of FBG sensors with cycle changes (Type 1)

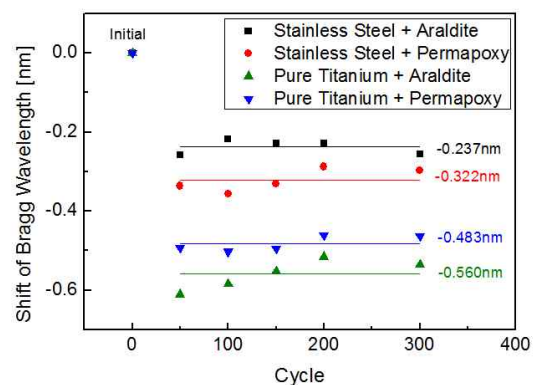


Fig. 6 Bragg wavelength shifts of FBG sensors with cycle changes (Type 2) [11]

영향이 Type 1에서는 에폭시가 접착된 양단에서 동시에 발생하므로, 서로 상쇄되었기 때문으로 판단된다. 그럼에도 불구하고, 시험결과에서 약 0.035 nm~0.058 nm 정도의 파장 이동이 발생한 것은 양단에 도포된 에폭시의 양 및 길이에 시편마다 어느 정도의 차이가 있고 시편 표면의 거칠

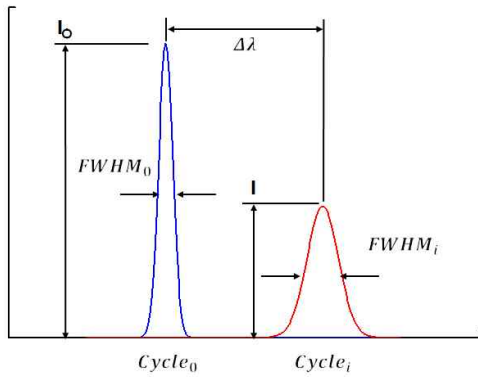


Fig. 7 Parameters on signal characteristics of FBG sensors

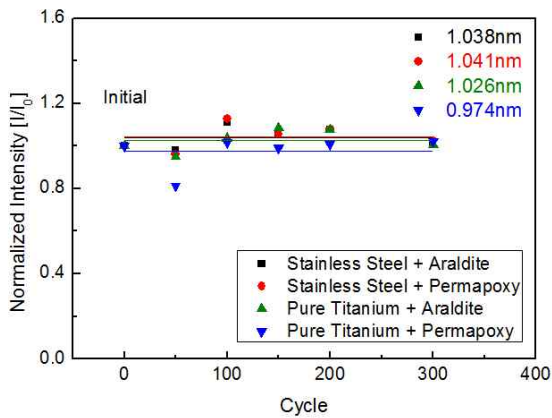


Fig. 8 Normalized intensity of FBG sensors with cycle changes (Type 1)

기 등의 차이에서 기인한 수축률 차이가 종합적으로 영향을 준 것으로 판단된다.

한편, FBG 센서의 경우 피크(peak) 형태의 신호에 대한 이동량을 기반으로 물리량을 측정하는 센서이므로 사이클 변화에 따른 피크 신호의 변화에 대한 분석이 중요하다. 이를 위해, 가장 대표적인 두 인자인 광 강도(light intensity) 및 반값너비(full width at half maximum, FWHM)를 확인하였다. Fig. 7은 FBG 센서의 피크 신호에서 광 강도 및 반값너비와 관련된 주요 인자들을 보여주고 있다. 먼저, 광 강도의 경우 Fig. 8과 같이 정규화된 강도값(normalized intensity), 즉 초기값대비 사이클 경과에 따른 강도값 변화를 관찰하였다.

그 결과, 4종의 시편 모두 1.0 근처의 값을 보여 사이클 경과에 따른 강도 변화는 관찰되지 않았다. 이는 Fig. 9에서 나타난 것처럼 초기값 대비 최대 53% 수준으로 광 강도가 낮아진 Type 2의 결과와는 대조를 이루었다. 마찬가지로, Fig. 10과 Fig. 11의 결과에서와 같이 반값너비의 경

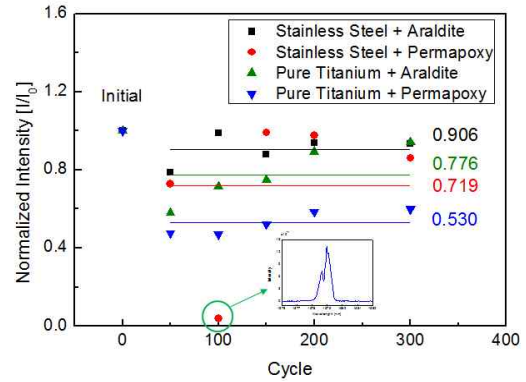


Fig. 9 Normalized intensity of FBG sensors with cycle changes (Type 2)

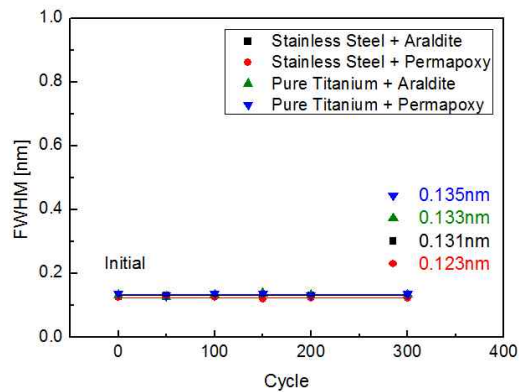


Fig. 10 FWHM of FBG sensors with cycle changes (Type 1)

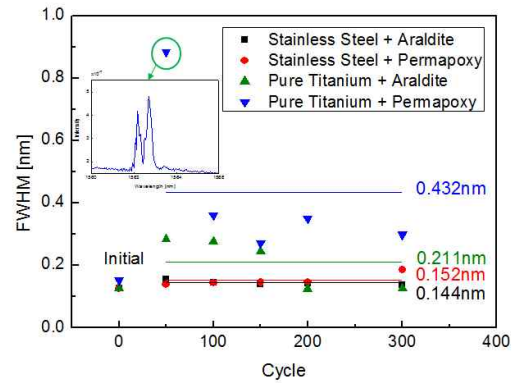


Fig. 11 FWHM of FBG sensors with cycle changes (Type 2)

우도 Type 1은 변화없이 유지된 반면, Type 2의 경우 전반적으로 값이 큰 폭으로 증가하였다. 한편, Fig. 9와 Fig. 11의 특정 시편, 특정 사이클 (stainless steel + permapoxy - 100사이클, titanium grade 2 + permapoxy - 50사이클)에서 관찰된 복굴절(birefringence) 현상은 반복적인 열하중에 의한 에폭시 열화(aging)로 브래그 격자 부분에서 일시적으로 불균일한 응력이 작용되었기 때문으

로 판단된다.

이와 같은 사실들을 종합해보면, 장기간 반복 열하중이 가해지는 환경에 노출된 FBG 센서의 경우 우선 패키징 형태에 대해서는 Type 1(양단 접착)이 Type 2(직접 접착)보다 더 높은 신호 안정성을 가짐을 확인하였다. 그리고, 모재의 종류에 대해서는 Type 1과 같이 이용할 경우에는 차이가 없으나, 필요에 의해 패키징을 Type 2와 같이 적용할 경우 스테인리스가 티타늄보다 상대적으로 우수한 신호 특성을 보였다.

#### 4. 결론

본 연구는 장기 구조 건전성 모니터링시 반복 열하중에 의한 FBG 센서의 신호 안정성 영향에 대한 선행연구[11]의 후속 연구로, 선행연구[11]에서 다루지 않은 ‘양단’ 접착 방법에 의한 신호 안정성에 대해 분석하였다. 특히, 신호 안정성과 직접적으로 관계되는 광 강도값 및 반값너비에 대한 분석을 포함하여 선행연구[11] 결과와의 상대 비교를 통해 측정 결과에 대한 면밀한 분석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 장기간 반복 열하중이 가해지는 환경에 노출된 FBG 센서의 경우 패키징시 ‘양단’ 접착 방식이 ‘직접’ 접착 방식보다 신호 안정성이 더 높다.
- 모재에 따른 영향의 경우 ‘양단’ 접착 방식에서는 차이가 없으나 ‘직접’ 접착 방식에서는 스테인리스가 티타늄보다 상대적으로 신호 안정성이 우수하다.
- 따라서, 이러한 점을 고려할 때 FBG 센서의 패키징시 브래그 격자 부분을 ‘직접’ 접착 방식보다는 ‘양단’ 접착 방식을 적용하는 것이 더 바람직한 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원과 서울과학기술대학교 교내 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### References

[1] J. B. Ihn and F. K. Chang, "Pitch-catch active

sensing methods in structural health monitoring for aircraft structures," *Structural Health Monitoring*, Vol. 7, No. 1, pp. 5-19 (2008)

- [2] J. H. Lee, D. H. Kim and I. K. Park, "Application of a fiber Fabry-Perot interferometer sensor for receiving SH-EMAT signals," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 34, No. 2, pp. 165-170 (2014)
- [3] K. A. Kwon, M. Y. Choi, H. S. Park, J. H. Park, Y. H. Huh and W. J. Choi, "Quantitative defects detection in wind turbine blade using optical infrared thermography," *Journal of the Korean Society for Non-destructive Testing*, Vol. 35, No. 1, pp. 25-30 (2015)
- [4] H. Y. Kim and D. H. Kim, "Sensor system for multi-point monitoring using bending loss of single mode optical fiber," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 35, No. 1, pp. 39-45 (2015)
- [5] W. Chung and D. Kang, "Full-scale test of a concrete box girder using FBG sensing system," *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 3, pp. 643-652 (2008)
- [6] D. Kang, D. H. Kim and S. Jang, "Design and development of structural health monitoring system for smart railroad-gauge-facility using FBG sensors," *Experimental Techniques*, Vol. 38, No. 5, pp. 39-47 (2014)
- [7] A. Grillet, D. Kinet, J. Witt, M. Schukar, K. Krebber, F. Pirotte and A. Depré, "Optical fiber sensors embedded into medical textiles for healthcare monitoring," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 8, No. 7, pp. 1215-1222 (2008)
- [8] D. H. Kang, C. U. Kim and C. G. Kim, "The embedment of fiber Bragg grating sensors into filament wound pressure tanks considering multiplexing," *NDT&E International*, Vol. 39, pp. 109-116 (2006)
- [9] D. Kang, H. Y. Kim and D. H. Kim, "Enhancing thermal reliability of fiber-optic sensors for bio-inspired applications at ultra-high temperatures," *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, No. 7, pp. 074012 (2014)

- 
- [10] D. Kang, H. Y. Kim, D. H. Kim and S. Park, "Thermal characteristics of FBG sensors at cryogenic temperatures for structural health monitoring," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 17, No. 1, pp. 5-9 (2016)
- [11] H. Y. Kim, D. Kang and D. H. Kim, "Reliability evaluation of fiber optic sensors exposed to cyclic thermal load," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 36, No. 3, pp. 225-230 (2016)
- [12] A. Mita and I. Yokoi, "Fiber Bragg grating accelerometer for structural health monitoring," 5<sup>th</sup> International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC 2000), Sydney, Australia (2000)
- [13] Y. J. Rao, D. J. Webb, D. A. Jackson, L. Zhang and I. Bennion, "In-fiber Bragg-grating temperature sensor system for medical applications," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 5, pp. 779-785 (1997)